

konstruktivne dijelove trupa i najmanje dvije palube. Njihovo je nadvođe znatno veće i mjeri se od neke niže a ne od najgornje palube.

**Teorija broda** je primjena teorijskih nauka — matematike, mehanike i hidromehanike — u brodogradnji. Brodogradnja, kao jedna od najstarijih ljudskih djelatnosti, dugo je sačuvala empiriju, koja joj još i danas daje poseban pečat između ostalih tehničkih znanja. Propisi klasifikacionih društava, propisi o nadvođu, o zaštiti ljudskog života na moru, o baždarenju itd., u kojima se ogleda vjekovno iskustvo brodograditelja, vežu projektanta i često sprečavaju primjenu novih teorijskih spoznaja.

Sredinom XVIII st. u radovima P. Bouguera, L. Eulera i D. Bernoullija nalaze se prva teorijska razmatranja o problemima broda, ali ti radovi kroz dugi period vremena ne nalaze bilo kakvu praktičnu primjenu. Razvoj industrije u XIX st. i njime uvjetovan nagli razvoj nauke u XX st. nisu mogli mimoći ni brodogradnju. Potreba za sve većom sigurnošću, udobnošću i brzinom broda, upotreba novih materijala i novih načina gradnje i pogona broda, znatno povećanje pomorskog transporta i time uslovljeni razvitak novih tipova brodova, imali su za posljedicu polagan ali siguran prodor nauke u brodogradnju. Teorija broda, nastala iz radova pojedinih učenjaka koji su nastojali matematički obraditi neke probleme u brodogradnji (npr. stabilitet broda, otpor gibanja broda, sile kojima djeluje uzburkano more na brod i gibanja koje ono uvjetuje) postaje posebna nauka, koja obogaćuje i osnovne nauke iz kojih se razvila.

Teorija broda obrađuje probleme predočivanja brodske forme, čvrstoće, plovnosti, stabiliteta, nepotonljivosti, porinuća, otpora i propulzije broda, kormilarenja i ponašanja broda na valovima. U narednim poglavljima ovog članka ti su problemi pojedince obrađeni.

**Oznake i simboli u brodogradnji.** Do sada ne postoje u brodogradnji i teorijskim disciplinama koje se odnose na brod jedinstvene oznake i simboli. Tek u najnovije vrijeme čine se pokušaji da se i brodogradni simboli na neki način ujednače i standardiziraju. Nasilac tih nastojanja je Međunarodna konferencija za brodsku hidrodinamiku (International Towing Tank Conference), koja je do sada usvojila izvjestan broj standardnih simbola, uglavnom sa područja brodske hidrodinamike.

U ovoj Enciklopediji se je nastojalo da simboli i oznake u člancima o brodu i brodogradnji budu što više u duhu do sada usvojenih ili predloženih standardnih međunarodnih simbola. Indeksi u pojedinim simbolima, ako su uzeti prema međunarodnim oznakama, po pravilu su pisani velikim slovima. U slijedećoj tablici je objašnjeno značenje najčešće upotrebljivanih indeksa prema međunarodnim oznakama, koje su razrađene na osnovu engleske terminologije.

Indeks	Značenje	Indeks	Značenje
A	amplitude (amplituda), advance (napredovanje), apparent (prividan)	M	middle (srednji, sredina)
B	braked (kočen), behind (iza), block (blok)	N	nominal (nominalan)
C	construction (konstrukcija, -cijski)	OA	over all (preko svega)
D	drag (otpor), developed (razvijen), delivered (predan)	P	projected (projiciran), propeller (propeler), prismatic (prizmatični)
E	effective (efektivan), entrance (pramčano zaoštrenje), expanded (raširen), encounter (susret)	PP	perpendiculars (perpendikulari, okomice)
F	friction (trenje)	R	residual (preostali), resistance (otpor), run (krmeno zaoštrenje), rudder (kormilo)
H	hull (trup) heel (nagib broda)	S	shaft (osovina), ship (brod)
I	ideal (idealan), indicated (indiciran), induced (induciran)	T	total (ukupan), thrust (poriv), transversal (poprečan)
L	lift (uzgon), longitudinal (uzdužan), lateral (bočni)	V	virtual (virtuelan)
		W	wave (val), waterplane (ploha omeđena vodnom linijom)
		WL	water line (vodna linija)

**Gradnja broda.** Radovi (i troškovi) u vezi s građenjem broda počinju s potpisom ugovora o gradnji između brodovlasnika i brodogradilišta, a završavaju s istekom garantnog roka za predati odn. primljeni brod. Stoga pojam gradnje broda u širem smislu obuhvaća, pored samog građenja i opremanja broda, također, s jedne strane, njegovo projektiranje i, s druge strane, završne i garantne radove nakon primopredaje. U nastavku ovog članka, iza poglavlja koja se bave teorijom broda, obrađuju se: materijali od kojih je brod sagrađen, dijelovi njegove konstrukcije, uređaji kojima je opremljen, proces njegova projektiranja i postupci njegova građenja od polaganja kobilice do završetka garantnih radova.

S. Ercegović A. Sentić

#### PREDOČIVANJE BRODSKE FORME

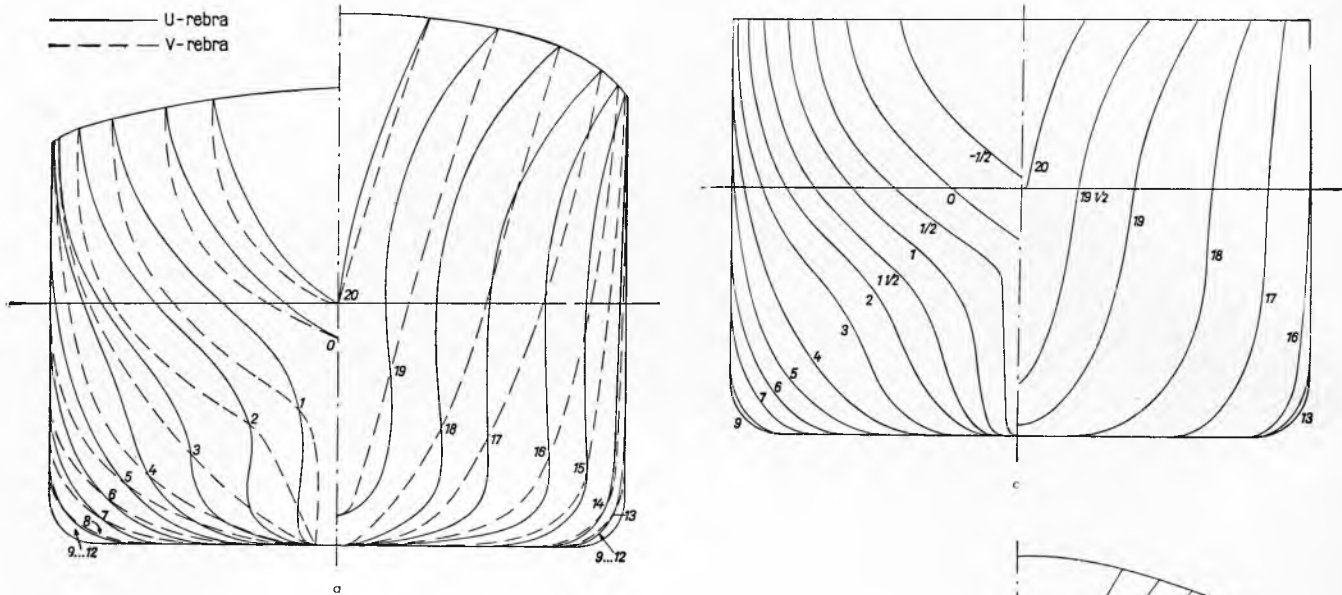
Oblik broda (brodska forma) uvjetovan je mnogobrojnim, često protuslovnim zahtjevima koje mora zadovoljiti neki

brod. Najvažniji od tih zahtjeva jesu: dovoljne površine paluba i dovoljni volumeni brodske prostora; ostvarenje uzgona i dovoljan stabilitet broda u neoštećenom i oštećenom stanju; mali otpor i povoljni uslovi propulzije; dobra maritimna svojstva, dovoljna čvrstoća i krutost konstrukcije i, konačno, estetski izgled. Dobrom formom broda trebalo bi zadovoljiti istovremeno sve navedene zahtjeve, a uz to i različite propise državnih vlasti i međunarodnih konvencija. To u potpunosti nije moguće, pa su se zbog toga tokom vremena razvili pojedini tipovi brodova (neki od njih su iščeznuli, a danomice nastaju novi) kod kojih se na jedna svojstva polaže više, a na druga manje važnosti.

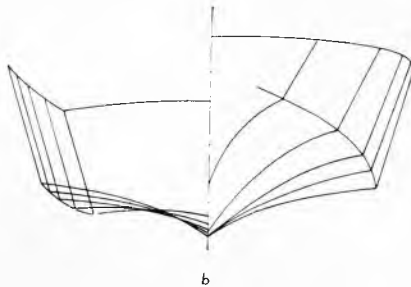
Među najvažnija svojstva ratnih brodova spada brzina. Zato oni imaju dugačke i vitke forme, karakterizirane visokim odnosom dužine prema širini i malim vrijednostima koeficijenta podvodne forme broda. Trgovački brodovi moraju imati dovoljnu zapreminu unutar trupa broda (brodovi za prijevoze lakih tereta) ili dovoljnu istisninu (brodovi za prijevoz teških tereta), a gradnja i pogon moraju biti ekonomični. Trgovački brodovi voze manjim brzinama, pa su u njih odnosi dužine prema širini manji, a koeficijenti podvodne forme veći. Putnički brodovi uz dovoljnu zapreminu razvijaju veću brzinu, i zbog toga su njihove forme vitkije od formi teretnih brodova, a punije od formi ratnih brodova; velika se zapremina postiže u nadvodnom dijelu broda izgradnjom mnogobrojnih nadgrada, koja daju putničkom brodu karakterističan izgled. Potreban stabilitet putničkih i ratnih brodova sa većim odnosom dužine prema širini osigurava se većim nadvođem. Teretni brodovi imaju malo nadvođe, pa se dovoljan stabilitet može postići jedino manjim odnosom dužine prema širini, što često ide na štetu dobrih pomorskih svojstava. Ova se mogu poboljšati ispravnim oblikovanjem brodske pramca i većim skokom palube, koji je važan također za stabilitet i plovnost broda kad u slučaju oštećenja u nj prodre voda. Od riječnih brodova se ne zahtijevaju dobra pomorska svojstva niti velika čvrstoća na valovima, ali oni mogu imati samo ograničen gaz. Njihove forme su karakterizirane visokim odnosom dužine prema širini broda i visokim koeficijentima forme trupa, jer se samo tako može uz mali gaz postići dovoljna zapremina skladišta, odnosno istisnina broda. Remorkerima su najvažnija manevarska svojstva i dobar stabilitet, pa imaju mali odnos dužine prema širini i veliki odnos širine prema gazu.

Brodovi sa deplasmanskim formama, tj. brodovi čiju ukupnu težinu preuzimaju hidrostatičke sile, ne mogu preći stanovitu granicu brzine, jer otpor valova naglo raste s porastom brzine. Da bi se postigle veće brzine, brod treba podići iznad vode ili ga sasvim zaroniti u vodu. Odsustvo otpora valova kod podmornice, torpeda i brodova s podvodnim krilima koji se dižu iznad vode dovelo je do aerodinamičkih formi tih plovila. Zbog stvaranja valova (tzv. utjecaja slobodne površine), aerodinamičke forme se ne mogu primijeniti na brodove koji plova na granici dvaju medija (vode i zraka). Prijelaz između deplasmanskih brodova i brodova s podvodnim krilima čine gliseri. Hidrodinamički uzgon koji se stvara na kliznim ploham glisera diže jedan dio trupa iznad vode i time mu smanjuje otpor. Karakteristika podvodnih formi deplasmanskih brodova je kontinuiranost linija (sl. 1 a, c, d), budući da svaki nagli prijelaz ima za posljedicu otjecpljenje strujnica tekućine i stvaranje virova, a to znači i povećanje otpora. Nasuprot tome klizne plohe glisera čine oštar kut s ostalim dijelom brodske forme (sl. 1 b), jer se hidrodinamički uzgon postiže upravo naglim skretanjem vodenog mlaza. Manje uobičajene forme su forme dvotrupnih brodova (katamarana). Oni su nastali u želji da se poveća stabilitet (sportske jedrilice), da se dobije vrlo velika površina palube (desantni brodovi za prijevoz tenkova) i da se smanji otpor valova (koji je približno proporcionalan kvadratu širine broda) i ljuljanje broda na valovima. Dvotrupni brodovi imaju otpor trenja veći nego jednotrupni (jer je trenje proporcionalno uronjenoj površini broda), pa se zbog toga u području manjih brzina, gdje je otpor trenja značajniji od otpora valova, ne postiže smanjenje ukupnog otpora.

**Dijelovi brodske forme.** Prednji kraj brodske trupa zove se *pramac* a stražnji *krma*. Većina današnjih brodova ima skošeni i naprijed izbačeni pramac, ali pojedini tipovi brodova mogu imati okomit ili drukčiji pramac. Tokom vremena razvile su se za velike i brze brodove i specijalne forme pramca (Jurke-

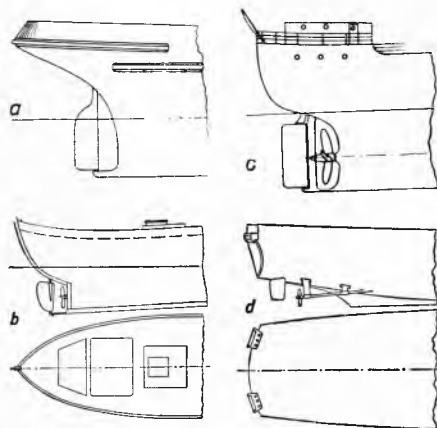


Sl. 1. Oblici teorijskih rebara brodova. *a* brodske forme sa U- i V-rebrima, *b* oblik rebara glisera, *c* Maierova forma pramca i krstaška forma krme, *d* Jurkevičeva forma s bulb-pramcem



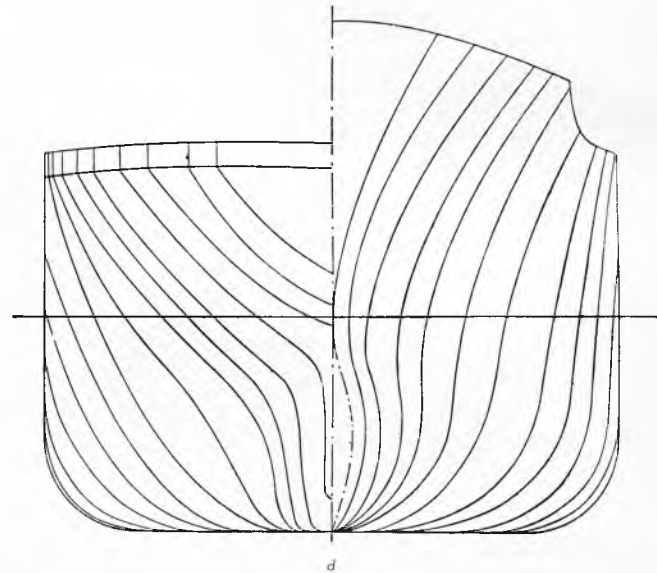
vič, Maier, bulb-pramac) kojima je svrha da smanje pramčani val, jer on predstavlja za propulziju izgublenu energiju (sl. 1c, d). Postoje i različiti oblici krme (sl. 1c i 2): krma s prijelomom (ili viseća krma), eliptična krma, krstaška krma, krma sa zrcalom (ili odrezana, ili transom-krma).

Krajevi broskog trupa su redovito zaoštreni i zovu se *pramčano* i *krmeno zaoštrenje*. Oblik krajeva broda ovisi ne samo o konturi pramca i krme nego i o obliku poprečnih presjeka ili



Sl. 2. Oblici brodskih krma. *a* krma s prijelomom (viseća krma), *b* elipsasta krma, *c* krstaška krma, *d* odrezana (zrcalna) krma

*rebara*. Poprečna rebara mogu biti oblika sličnog ili slovu U ili slovu V, ili su nekog oblika između ta dva ekstrema (sl. 1 a). Većina brodova ima kontinuirano zakrivljena rebara, ali ima brodova čija su rebara na jednom ili na dva mjesta oštro prelomljena: takav se prelom zove *zglob* (sl. 1 b).



Na nekim brodovima, kao npr. na velikim teretnim brodovima, tankerima i riječnim brodovima, dio trupa između pramčanog i krmenog zaoštrenja ima konstantan poprečni presjek pa se taj dio trupa zove *paralelni srednjak*. Poprečni presjek na sredini trupa naziva se *glavno rebro* i obično se označava sa  $\otimes$ .

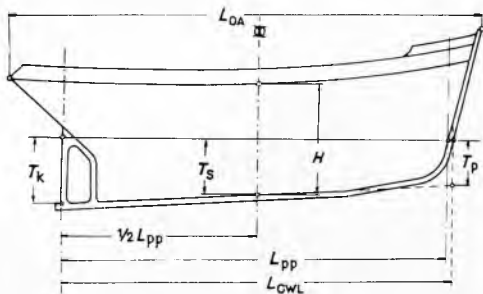
Dno broda je ravno ili manje ili više skošeno prema bokovima, a prijelaz dna u bokove zove se *uzvoj*. Oblik uzvoja, tj. njegov radijus zakrivljenosti, ovisi o tipu broda. Sa gornje strane trup broda je zatvoren *palubom*. Paluba obično nije ravna nego se uzdiže od sredine prema pramcu i krmi. Razlika između visine palube na glavnom rebro i na krajevima broda zove se *skok palube*. U poprečnom smjeru paluba je također lagano zaobljena, tj. u uzdužnoj simetrali broda je nešto viša nego na bokovima. To poprečno zaobljenje palube se zove *preluk*.

**Parametri brodske forme.** Usprkos nastojanjima teoretičara da se oblik broda izrazi matematičkim formulama, danas se on još uvijek definitivno prikazuje jedino grafički *brodskim linijama*, koje se crtaju po pravilima deskriptivne geometrije. Međutim, radi uspoređivanja različitih formi broda i za proračune pri projektiranju broda potrebno je definirati neke parametre koji karakteriziraju oblik broda. To su *glavne dimenzije broskog trupa* i njihovi međusobni odnosi, nadalje *bezdimenzijski koeficijenti brodske forme*, površine presjeka broskog trupa različnim ravninama i krivulje koje prikazuju kako se te površine mijenjaju kad se mijenja položaj ravnine presjeka. Najvažnija od tih krivulja je *areala rebara*.

Glavne su dimenzije broda: *dužina, širina, visina* i *gaz*. Pojedine glavne dimenzije nisu definirane jednoznačno, već se mjere

na različite načine, bilo zbog praktičnih razloga radi olakšanja različitih tehničkih proračuna broda, bilo zbog toga što različiti propisi različito definiraju glavne dimenzije broda (sl. 3).

*Dužina preko svega*,  $L_{OA}$ , je dužina mjerena između dva vertikalna pravca koji prolaze kroz krajnje tačke broda. O toj dužini ovisi potreban prostor za privez broda u luci, potrebna dužina brodske komore i doka, itd.



Sl. 3. Dužina i gaz broda

*Dužina između okomica (perpendikulara)*,  $L_{PP}$ , je dužina mjerena između pramčane i krmene okomice. Pramčana okomica prolazi kroz sjecište konstrukcijske vodne linije s prednjim rubom pramčane statve, a krmena okomica kroz sjecište konstrukcijske vodne linije sa stražnjim rubom statve kormila, ili ako nje nema, kroz središte osovine kormila. Ova dužina služi za pojedine hidrostatičke proračune i za dimenzioniranje elemenata trupa prema propisima klasifikacionih društava.

*Dužina na vodnoj liniji*,  $L_{WL}$ , mjeri se između dvije okomice postavljene kroz sjecište vodne linije s konturom broda. Analogno je definirana *dužina na konstrukcijskoj vodnoj liniji*  $L_{CWL}$ . Dužina na vodnoj liniji služi u proračunu otpora broda, proračunu nadvođa i proračunu prodora vode i nepotonljivosti.

*Deplasmanska dužina*,  $L_{\Delta}$ , općenito se definira kao  $L_{PP} + a\%$ . Postotak  $a$  varira prema tipu krme. Upotrebljava se pri projektiranju broda.

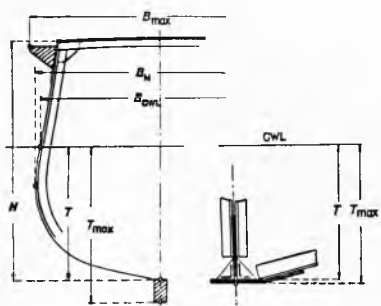
*Baždarska dužina*,  $L_{reg}$ , mjeri se na tonažnoj palubi između unutarnjih lica oplata na pramcu i krmi. Služi za određivanje zapremine broda.

Za razne tehničke i teorijske proračune služe i ove dužine:

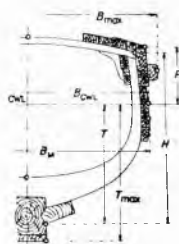
*Dužina pramčanog zaoštrenja*,  $L_E$ , mjeri se od pramčane okomice do početka paralelnog srednjaka, a ako ovog nema, do najvećeg poprečnog presjeka.

*Dužina paralelnog srednjaka*,  $L_p$ , je dužina na kojoj trup ima konstantan poprečni presjek.

*Dužina krmenog zaoštrenja*,  $L_R$ , mjeri se od kraja paralelnog srednjaka ili, ako ovog nema, od najvećeg poprečnog presjeka do sjecišta vodne linije s konturom krme broda.



Sl. 4. Širina, bočna visina i gaz čeličnog broda



Sl. 5. Širina, bočna visina, gaz i nadvođe drvenog broda

*Proračunska širina*,  $B$ , je najveća širina na podvodnom dijelu trupa. Na čeličnim brodovima mjeri se do vanjskog ruba rebara, (sl. 4), na drvenim brodovima do vanjske oplata (sl. 5), a na ratnim brodovima do vanjske strane oklopa. Upotrebljava se u svim proračunima broda.

*Širina na glavnom rebru*,  $B_M$ , je najveća širina na podvodnom dijelu glavnog rebra. Većinom je jednaka proračunskoj širini.

*Širina na konstrukcijskoj vodnoj liniji*,  $B_{CWL}$ , je najveća širina na konstrukcijskoj vodnoj liniji. Za većinu brodova je jednaka proračunskoj širini.

*Maksimalna širina*,  $B_{max}$ , je najveća širina broda bilo na podvodnom bilo na nadvodnom dijelu. Mjeri se na najširem mjestu broda preko bokoštitnica i drugih dijelova koji strše preko bokova broda. Ova širina je važna za ulaz u luku, dokove i splavnice, također za prolaz između stupova mostova.

*Baždarska širina*,  $B_{reg}$ , je najveća unutarnja širina između drvenog priboja na obje strane broda. Služi za određivanje zapremine broda.

*Bočna visina*,  $H$ , mjeri se na polovici dužine broda, i to na boku, na željeznim brodovima od horizontale kroz gornji rub kobilice do gornjeg brida krovne sponje najviše neprekinute palube (glavne palube ili gornje palube, sl. 4) a na drvenim brodovima od vanjskog utora oplata na kobilici do najviše neprekinute palube (sl. 5). Služi u proračunu čvrstoće broda, nepotonljivosti, stabiliteta i za dimenzioniranje elemenata trupa prema propisima klasifikacionih društava.

*Gaz*,  $T$ , mjeri se na polovici dužine broda i to na čeličnim brodovima od plovne vodne linije do gornjeg brida kobilice (sl. 4), a na drvenim brodovima do vanjskog brida utora oplata na kobilici (sl. 5). Gaz služi u različitim proračunima broda. Gaz ne mora biti jednak uzduž čitavog broda, pa se razlikuje (v. sl. 3): *gaz na pramcu*,  $T_p$ , koji se mjeri od sjecišta produženja gornjeg brida kobilice s pramčanom okomicom do plovne vodne linije; *gaz na krmi*,  $T_k$ , mjen od sjecišta produženja gornjeg brida kobilice s krmenom okomicom do plovne vodne linije; *srednji gaz*,  $T_s$ , na sredini broda ili srednja vrijednost između gaza na pramcu i gaza na krmi, *maksimalni gaz*,  $T_{max}$ , vertikalna udaljenost između plovne vodne linije i najniže tačke na podvodnom dijelu broda. Ovaj gaz je naročito važan kod brodova koji plove vodama ograničene dubine i mjerodavan je za visinu vode iznad praga splavnice ili doka.

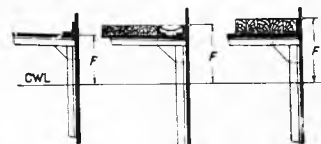
*Gaz na konstrukcijskoj vodnoj liniji ili konstrukcijski gaz*,  $T_{CWL}$ , definiran je jednako kao gaz  $T$ , samo što je fiksirano da se mjeri od konstrukcijske, a ne bilo koje plovne vodne linije.

*Nadvođe*,  $F$ , je visina nadvodnog dijela broda, mjerena na boku u sredini dužine između okomica, od teretne vodne linije do gornjeg ruba opločenja palube nadvođa (sl. 5 i 6).

Istisnina broda (deplasan) može se definirati na dva načina: kao volumen (označava se sa  $\nabla$ ) ili kao masa odn. težina (označava se sa  $\Delta$ ).

*Istisnina broda*  $\nabla$ , (volumen istisnine), ukupni je volumen podvodnog dijela broda bez privjesaka. Za čelične brodove računa se volumen unutar vanjskog ruba rebara, dakle bez oplata, a za drvene brodove uzima se u obzir i debljina oplata. Istisnina kao volumen izražava se u volumenskim jedinicama, kubnim metrima ( $m^3$ ) ili kubnim stopama (cu. ft.). *Istisnina broda*  $\Delta$  jest masa odn. težina vode istisnute brodom. Prema Arhimedovu zakonu težina istisnute vode jednaka je uzgonu, a u stanju ravnoteže uzgonu je jednaka težina broda. Prema tome istisnina  $\Delta$  predstavlja i težinu odn. masu broda. Izražava se u jedinicama mase, i to redovito u tonama (t) od 1000 kg ili engleskim tons (ts) od 1016 kg.

Brodograditelji danas još pretežno računaju s jedinicama tehničkog sistema mjeri i za njih tone istisnine predstavljaju tone *sile*, koje se u mnogim zemljama (među njima je i naša) prema novim propisima nazivaju megapondima. Otkad je u većini zemalja evropskog kontinenta zakonima usvojen sistem mjera MKSA, u kojemu se samo masa mjeri kilogramima i tonama, počele su se i u brodogradnji veličine izražene tim jedinicama nazivati masama, a ne više težinama (ili se podrazumijevaju mase, iako se iz običaja govori o težinama). Kako su brojčane vrijednosti sila izraženih u kilopondima (kp) i megapondima (Mp) jednake brojčanim vrijednostima mase izraženih u kilogramima i tonama, mogu se brojčane vrijednosti istisnine  $\Delta$  i drugih masa na brodu, izraženih u kilogramima i tonama, bez daljeg upotrijebiti u proračunima broda za mjerenje težina i drugih sila, s time da u tom slučaju predstavljaju jedinice tehničkog sistema mjeri, kiloponde i megaponde, ali pri tom treba imati u vidu da su jedinice mase tehničkog sistema za faktor  $g$  veće od kilograma i tone, pa se brojčane vrijednosti u tim jedinicama dobiju iz brojčanih vrijednosti u kilopondima i megapondima dijeljenjem s tim faktorom. U ovom članku istisnina će se mahom tretirati kao težina.



Sl. 6. Nadvođe čeličnih brodova

Oblik broskog trupa i raspored istisnine po dužini i visini broda karakteriziraju *koeficijenti forme trupa*:

*Koeficijent istisnine*,  $\delta$  ili  $C_B$ , jest omjer volumena istisnine broda i volumena pravokutnog paralelepipeda čiji su bridovi jednaki dužini, širini i gazu broda:

$$\delta = \frac{V}{L \times B \times T}$$

*Koeficijent glavnog rebra*,  $\beta$  ili  $C_M$ , jest omjer površine uronjenog dijela glavnog rebra  $A_M$  i površine pravokutnika čije su stranice širina glavnog rebra i gaz na glavnom rebu:

$$\beta = \frac{A_M}{B \times T}$$

*Koeficijent vodne linije*,  $\alpha$  ili  $C_{WP}$ , jest omjer površine plovne vodne linije  $A_W$  i površine pravokutnika čije su stranice dužina broda i širina glavnog rebra:

$$\alpha = \frac{A_W}{L \times B}$$

Pod *površinom vodne linije*,  $A_W$ , razumijeva se površina plohe omeđene vodnom linijom. (Jednako treba razumjeti i analogne druge u brodogradnji uobičajene izraze koji govore o »površini neke linije ili krivulje«).

*Prizmatički koeficijent*,  $\varphi$  ili  $C_p$ , jest omjer volumena istisnine broda i volumena valjka čija je baza jednaka površini glavnog rebra, a visina dužini broda:

$$\varphi = \frac{V}{A_M \times L} = \frac{\delta}{\beta}$$

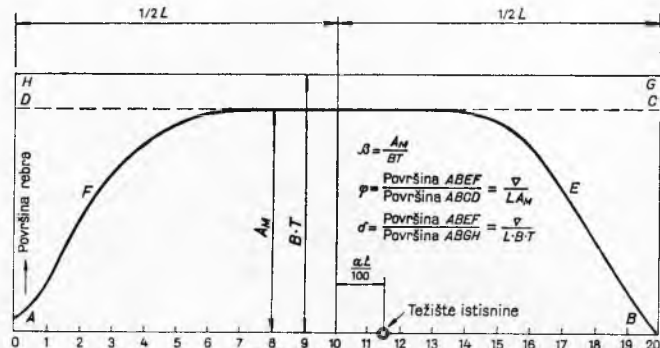
*Vertikalni prizmatički koeficijent*,  $\varphi_v$ , ili  $C_{VP}$ , jest omjer volumena istisnine broda i volumena valjka čija je baza jednaka površini plovne vodne linije  $A_W$ , a visina srednjem gazu broda:

$$\varphi_v = \frac{V}{A_W \times T} = \frac{\delta}{\alpha}$$

U analizama i proračunima otpora i propulzije broda često se upotrebljavaju i *pramčani* odnosno *krmeni koeficijent istisnine* i *pramčani* odnosno *krmeni prizmatički koeficijent*. Ti se koeficijenti odnose samo na pramčanu ili krmenu polovicu broda, a služe za još preciznije definiranje forme trupa.

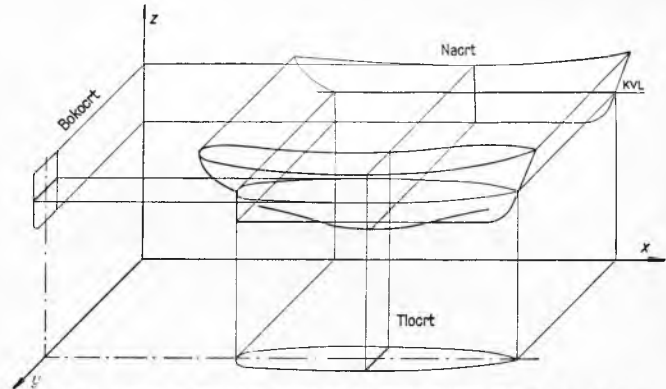
*Areala rebara* ili *krivulja površina rebara* (sl. 7) definira raspored istisnine po dužini broda. Površina ispod ove krivulje jednaka je volumenu istisnine. Pri projektiranju oblika broskog trupa redovito se polazi od neke odabrane areale rebara.

**Brodske linije** su karakteristični presjeci brodske forme sa sistemom paralelnih ravnina koje se obično uzimaju u jednakim razmacima. Nacrt brodskih linija sadrži tri projekcije: pogled odozgo ili tlocrt, pogled sa strane ili nacrt i pogled s čela ili bokocrt



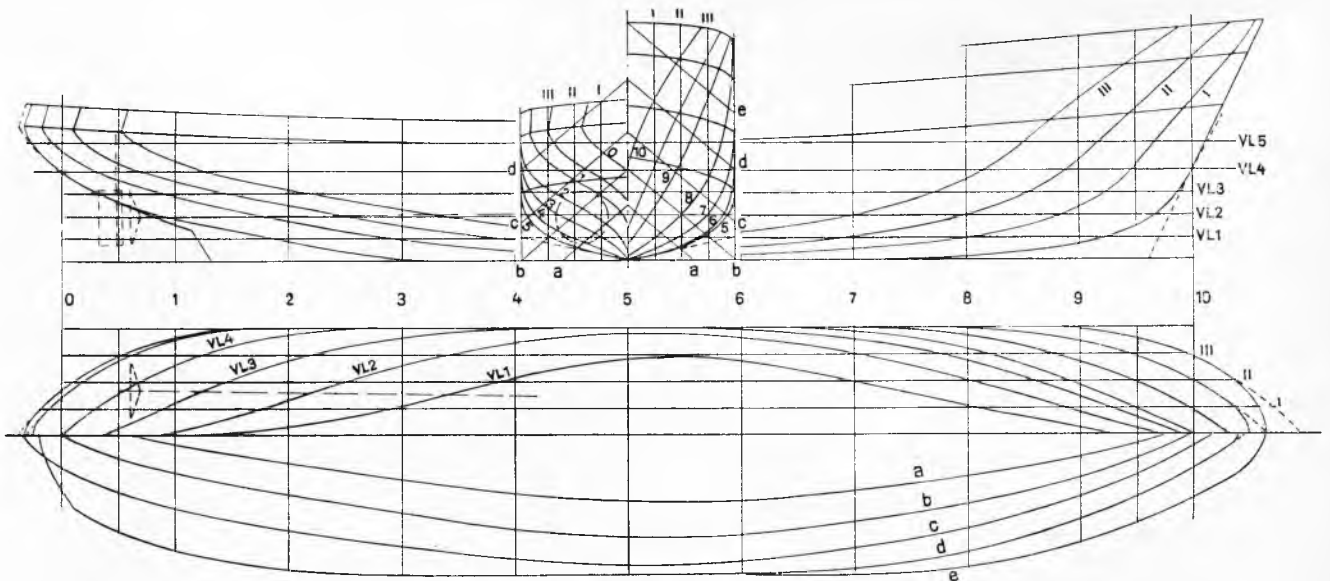
Sl. 7. Areala rebara

(sl. 8). Prema tome se brodska forma siječe s tri serije paralelnih ravnina, i to serijom horizontalnih ravnina, serijom uzdužnih vertikalnih ravnina i serijom poprečnih vertikalnih ravnina. Presjeci brodske forme sa serijom horizontalnih ravnina projicirani u tlocrt prikazuju *vodne linije* broda, projekcije presjeka s uzdužnim vertikalnim ravninama prikazuju u nacrtu *uzdužnice* ili *vertikale* broda, a projekcije presjeka s poprečnim vertikalnim ravninama prikazuju u bokocrtu *teorijska rebra* broda. Presječne se ravnine



Sl. 8 Projekcije broskog trupa na tri među sobom okomite ravnine

odabiru tako da se odgovarajući presjeci prikazuju u jednoj ravnini projekcije u pravom obliku, tj. kao krivulje, a u druge dvije kao pravci. Prema tome u svakoj projekcijskoj ravnini postoji jedna serija krivulja i dvije serije međusobno okomitih pravaca (sl. 9).



Sl. 9. Brodske linije (peljarski brod »Ditmar Koel III«)

Kako je forma broda obično simetrična s obzirom na uzdužnu simetralnu ravninu (jedine iznimke su venecijanske gondole i nosači aviona), središnji vertikalni presjek daje konturu broda, a crtež rebara je simetričan. Zbog toga se u bokocrtu crtaju rebra a u tlocrtu vodne linije samo jednog boka. Uobičajeno je brod crtati tako da mu je pramac uvijek na desnoj strani nacrtaja; pramčana rebra crtaju se na desnoj, a krmena na lijevoj strani bokocрта (sl. 9). Premda bi za fiksiranje brodske forme bile dovoljne dvije projekcije, crta se i treća, a često i četvrta, radi kontrole tačnosti. Četvrta projekcija daje crtež *širnica*, a predstavlja presjeke brodske forme kosim ravninama. Ti presjeci crtaju se u pravom obliku u tlocrtu (dakle se zaokreću u horizontalnu ravninu), obično tako da gornji dio crteža prikazuje vodne linije, a donji širnice (sl. 9). Brodske linije se najčešće crtaju sa 10 (u iznimnim slučajevima 20) rebara, sa umetnutim polovičnim razmacima na krajevima broda i sa 4 vodne linije za podvodni dio brodske forme, sa umetnutim polovičnim razmakom na dnu broda.

Osim teorijskih vodnih linija predstavljenih u nacrtu forme trupa, kao brodograđevni pojmovi važne su još i ove vodne linije: *plovna vodna linija*, presjecište broskog trupa s ravninom do koje brod uroni u vodu; ta vodna linija dijeli brodski trup na nadvodni i podvodni dio. Površina podvodnog dijela broskog trupa zove se *uronjena ili oplakana površina*; *konstrukcijska vodna linija*, CWL, plovna vodna linija koja odgovara konstrukcijskom gazu broda, tj. vodna linija na kojoj bi prema projektu trebalo da plovi potpuno opremljen i opterećen brod; *teretna vodna linija*, do koje smije najviše da uroni potpuno opremljen i natovaren brod; određuju je propisi o nadvodu i u principu bi se morala poklapati s konstrukcijskom vodnom linijom; *laka vodna linija*, na kojoj plovi potpuno opremljen brod, ali bez tereta; *pregradna teretna vodna linija*, vodna linija prema kojoj je određena podjela broda pregradama.

**Matematičke forme.** Brodske linije imaju parabolni oblik (crtaju se pomoću elastičnih letvica koje kod malih progiba daju parabolne krivulje), pa se mogu matematički najbolje predočiti cijelim racionalnim polinomima. Mogle bi se predočiti i drugim matematičkim funkcijama, npr. Fourierovim redovima ili hiperbolnim funkcijama, ali lakoća kojom se racionalne funkcije mogu integrirati daje im toliku prednost da se one isključivo upotrebljavaju za matematičko definiranje brodske forme.

Problem matematičkog predočivanja brodske plohe svodi se na pronalaženje jedne kontinuirane funkcije koja uz zadane rubne uvjete (održavanje konture broda) i još neke druge uvjete (dovoljan stabilitet i prostornost itd.) daje minimalan otpor (minimum uronjene površine i Michellova integrala). Posrijedi je dakle račun varijacija sa zadanim rubnim uvjetima, koji se upotrebljava i na drugim područjima brodogradnje, npr. za proračun čvrstoće ploča, samo što tamo umjesto uvjeta minimalnog otpora postoje uvjeti ravnoteže. Matematičko predočivanje brodske forme omogućava jednostavnije i tačnije hidrostatičke proračune broda, jednostavnu analizu glatkoće forme pomoću prve i druge derivacije brodskih linija, itd. Jednostavnosti radi posebni su matematički izrazi izvedeni za podvodni i posebni za nadvodni dio broskog trupa. Zbog toga se ishodište koordinatnog sistema polaže u ravnini plovne linije, i to u njejoj simetrali na polovici dužine broda. Os *x* prolazi duži-

nom, os *y* širinom, a os *z* visinom broda. U formulama se upotrebljavaju bezdimenzijske koordinate:

$$\xi = \frac{x}{L/2}; \quad \eta = \frac{y}{B/2}; \quad \zeta = \frac{z}{T}.$$

Jednadžba vodne linije može imati oblik:

$$y = \frac{B}{2} \left( 1 - \xi^n \right) \left( 1 - c \xi^m \right).$$

Prvim su faktorima ispunjeni granični uvjeti (za  $\xi = 1, y = 0$ ) i dobiven je red veličine punoće forme; drugi faktor određuje uglavnom formu i manje promjene u njenoj punoći — uz uvjet da su prikladno odabrani koeficijent *c* i eksponenti *n* i *m*. Slična je oblika i jednadžba za rebara, ali će ona zbog većih razlika u formi rebara biti sastavljena od više članova; tako npr. izraz  $(1 - c_1 \zeta)$  daje nagib rebara, izraz  $(1 - c_0 \zeta^r)$  uzima u obzir oblik donjeg dijela rebara (za velike *r* dolazi taj izraz do izražaja samo kod donjih vodnih linija), a s izrazom  $(1 - c \zeta^k)$  može se mijenjati punoća rebara. Ako se još uzme u obzir uslov konture broda:

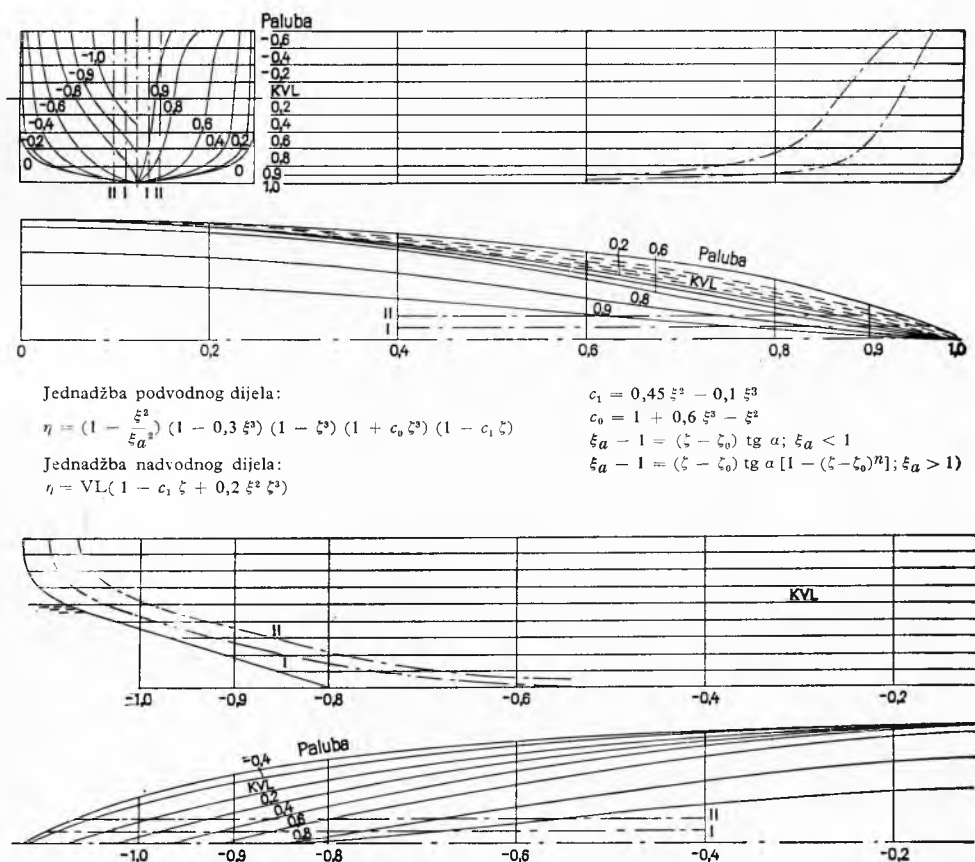
$$[1 - (\xi/\xi_a)^p]; \quad \text{za } \xi = \xi_a, y = 0,$$

gdje je  $\xi_a = \kappa(\zeta)$  jednadžba konture, dobiva se općenita jednadžba za podvodni dio brodske plohe:

$$\eta = [1 - (\xi/\xi_a)^p] (1 - \xi^n) (1 - c_0 \xi^m) (1 - c_1 \zeta) (1 - c \zeta^k) (1 - c_0 \zeta^r)$$

Umjesto umnoškom pojedinih faktora može se jednadžba forme broda predočiti i u vidu zbroja (dakle kao polinom), ako se izvrše operacije u zagradama. Takav izraz je zgodniji za praktičnu upotrebu, ali se u njemu gubi značenje pojedinih članova. Sličan je izraz za prikazivanje nadvodne forme broda (sl. 10).

Tisućama godina gradili su se brodovi na osnovu usmene predaje. Tek u XVI st. javljaju se prvi pokušaji da se prije gradnje broda njegov oblik više ili manje fiksira nacrtom. Najveću zaslugu za to imale su ratne mornarice pojedinih zemalja, jer im je bilo u interesu da raspoložu podacima o izgrađenim brodovima. Vjerojatno je švedski brodograditelj F. Chapman 1768. god. prvi objavio danas uobičajeni način crtanja brodskih linija. On je predložio i upotrebu matematički definiranih linija sastavljenih od parabolnih krivulja. Matematičke krivulje upotrebljavale su se i prije u brodogradnji: brodska su rebra oblikovana odavno kružnim ili eliptičnim lukovima. Između 1830 i 1870 brodograditelji Scott-Russel, J. Napier i dr. pokušavali su s matematičkim linijama koje su bile dijelovi sinusoida, cikloide, trohoida, odnosno strujnica oko Rankineovih te-



Sl. 10. Matematički definirana brodska forma



orijskih formi na skoro mističan način postići smanjenje otpora broda. J. Nyström je 1860, prema prijedlogu Chapmana, sastavio brodske linije od paraboličnih lukova, i time mogao proračunati ovisnost istisnine i položaj njenog težišta od gaza broda, za neki odabrani koeficijent istisnine. I on je predlagao forme najpovoljnijeg otpora, zasnovane na izvjesnoj zakonitosti raspodjele površina rebara po dužini broda (areala rebara). Početkom XX st. D. W. Taylor je razvio matematičku metodu za brzo projektiranje brodske forme određenih karakteristika i primijenio je u svojim sistematičnim ispitivanjima modela brodova. Njegova namjera nije bila da matematičkim definiranjem linija polučni forme minimalnog otpora, nego samo da dobije linije željenog oblika. Time je znatno olakšano sistematično mijenjanje forme mnogobrojnih grupa modela, ne samo pri njihovom osnivanju nego i pri crtanju njihovih linija. Dok je Taylor dao posebne jednadžbe za vodne linije, a posebne za rebra, G. Weinblum je nastojao 15 godina kasnije da nađe općenitu formulu koja bi predočivala cjelokupnu brodsku formu. Taj rad on je nastavio u USA poslije Drugog svjetskoga rata u Taylorovu basenu za ispitivanje modela. Osim pri ispitivanju modela, matematičke forme igraju veliku ulogu u teorijskim proračunima, kao što su proračuni plovnosti, stabiliteta i otpora broda, a imaju i znatnu praktičnu vrijednost, jer čine suvišnim crtanje brodskih linija u naravnoj veličini u crtari brodogradilišta.

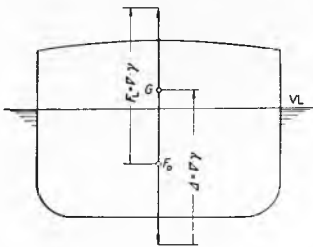
### PLOVNOŠĆ BRODA

**Uvjeti plovnosti.** Brod pluta na vodi na osnovu Arhimedova zakona, po kojem na svako tijelo uronjeno u tekućinu djeluje sila uzgona koja je jednaka težini istisnute tekućine. Dakle, da bi brod plutao, umnožak volumena njegova podvodnog dijela sa svim privjescima (vanjskom oplatom čeličnih brodova, kormilom, propelerom, skrokovima, osovinskim nogavicama itd.) i specifične težine tekućine u kojoj brod plovi mora biti jednak ukupnoj težini broda i svih predmeta na njemu. To je prvi uvjet plovnosti, koji se može izraziti jednadžbom:

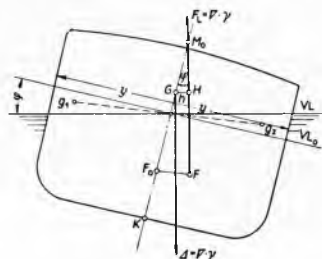
$$\Delta = F_L = \nabla \gamma,$$

gdje je  $\Delta$  težina broda i svih predmeta na njemu, tzv. težina sistema, ili jednostavno težina broda,  $F_L$  sila uzgona,  $\nabla$  volumen podvodnog dijela broda s privjescima,  $\gamma$  specifična težina vode u kojoj brod plovi.

Sila uzgona, koja se može smatrati rezultantom svih vertikalnih komponenata pritiska tekućine, prolazi kroz težište istisnute tekućine (težište istisnine  $F_o$ ), analogno kao što se uzima da ukupna težina broda djeluje iz jednog zajedničkog težišta (težišta sistema  $G$ ). Budući da dvije sile mogu biti u ravnoteži samo ako djeluju u istom pravcu, a pravac sila težine i uzgona je vertikalna, moraju se težište istisnine  $F_o$  i težište sistema  $G$  nalaziti na istoj okomici na plovnu liniju (sl. 1). To je drugi uvjet plovnosti.



Sl. 1. Drugi uvjet plovnosti



Sl. 2. Treći uvjet plovnosti

Treći je uvjet da brod mora ploviti u stabilnom položaju. To znači: ako se uslijed djelovanja vanjskih sila (vjetra, valova itd.) brod nagne za neki mali kut, on se mora sam vratiti u prijašnji položaj kad te sile prestanu djelovati. Kad se brod nagne, mijenja se njegov podvodni dio i položaj težišta tog dijela, pa smjer uzgona djeluje na nagnutom brodu iz tačke  $F$  umjesto iz  $F_o$ , dok težina broda djeluje kao i ranije iz težišta sistema  $G$ , ukoliko za vrijeme nagibanja sve težine ostaju na svojim mjestima (sl. 2). Na brod djeluje prema tome par sila veličine  $\Delta = \nabla \cdot \gamma$ , koje pomnožene s njihovim razmakom  $\overline{GH} = h$  daju moment početnog statičkog stabiliteta:

$$M_{st} = \Delta \cdot \overline{GH} = \Delta \cdot \overline{M_o G} \cdot \sin \varphi.$$

On se naziva početnim jer vrijedi samo za male nagibe, dakle u početku nagibanja broda. (Kad se brod nagne jače, smjer uzgona siječe simetralu broda u nekoj tački  $N$ , koja za normalne brodske forme obično leži iznad  $M_o$ .) Taj moment je pozitivan ako uspravlja brod (pa djeluje u smislu kako je nacrtan na sl. 2). Tačka  $M_o$  u kojoj smjer uzgona siječe simetralu broda, a koja se naziva početni metacentar, nalazi se iznad  $G$ , a početna metacentarska visina  $\overline{M_o G}$  je pozitivna. Ako je metacentarska visina negativna,

tačka  $M_o$  leži ispod  $G$ , brod se neće vratiti u prijašnji položaj nego će se i dalje nagibati, pa se može prevrnuti.

Sva tri uvjeta plovnosti vrijede za tijelo koje slobodno pluta na vodi i na koje ne djeluju i hidrodinamičke sile uzgona (kao što su deplasmanski brodovi). Da se ispita da li je ispunjen treći uvjet plovnosti, treba odrediti matematički izraz za položaj početnog metacentra  $M_o$ . Za male nagibe  $\delta\varphi$  vrijedi:

$$\overline{M_o F_o} = \frac{\overline{FF_o}}{\delta\varphi}.$$

Prema poučku o pomaku težišta:

$$\overline{F_o F} : \overline{g_1 g_2} = \nabla_k : \nabla, \text{ tj. } \overline{F_o F} = \frac{\nabla_k \cdot \overline{g_1 g_2}}{\nabla},$$

gdje je  $\nabla_k$  volumen uronjenog odnosno izronjenog dijela broda (uronjenog ili izronjenog klina) između vodnih linija  $VL_o$  i  $VL$ , a  $\overline{g_1 g_2}$  razmak njihovih težišta. Volumen uronjenog klina mora biti jednak volumenu izronjenog klina, jer se prema prvom uvjetu plovnosti veličina istisnine nakon nagibanja ne smije promijeniti. Moment klinova  $\nabla_k \cdot \overline{g_1 g_2}$  dobiva se (sl. 2) iz jednadžbe:

$$\nabla_k \cdot \overline{g_1 g_2} = \nabla_{kl} \cdot \overline{g_1 O} + \nabla_{ku} \cdot \overline{g_2 O},$$

gdje je  $O$  ishodište koordinatnog sistema, a  $d\nabla_k$  diferencijalni volumen klina. Volumen uronjenog klina jest:

$$\nabla_{ku} = \int_0^L d\nabla_{ku} = \int_0^L \frac{1}{2} y \cdot y \cdot \delta\varphi \cdot dx = \frac{\delta\varphi}{2} \int_0^L y^2 dx,$$

gdje je  $y$  ordinata vodne linije, a  $dx$  diferencijalni dio njene dužine. Moment uronjenog klina jest:

$$\nabla_{ku} \cdot \overline{g_2 O} = \int_0^L d\nabla_{ku} \cdot \frac{2}{3} y = \frac{\delta\varphi}{3} \int_0^L y^3 dx.$$

Analogno je moment izronjenog klina:

$$\nabla_{kl} \cdot \overline{g_1 O} = \frac{\delta\varphi}{3} \int_0^L y^3 dx.$$

Prema tome je

$$\nabla_k \cdot \overline{g_1 g_2} = \delta\varphi \cdot \int_0^L y^3 dx.$$

Kako  $\frac{1}{3} y^3 dx$  predstavlja moment tromosti površine pravokutnika visine  $y$  i baze  $dx$  s obzirom na osnovku, to je:

$$\int_0^L y^3 dx = I_T,$$

moment tromosti površine plovne linije  $VL_o$  s obzirom na njenu simetralnu uzdužnu os, pa je moment klinova  $\nabla_k \cdot \overline{g_1 g_2} = I_T \cdot \delta\varphi$ . Dakle, pomak težišta istisnine je:

$$\overline{F_o F} = \frac{I_T \cdot \delta\varphi}{\nabla},$$

odnosno početni metacentarski radijus  $r_o$ :

$$\overline{M_o F_o} = \frac{I_T}{\nabla}.$$

Visina početnog metacentra iznad kobilice broda (osnovke), tj. udaljenost  $\overline{KM_o}$ , određuje se za poznati položaj težišta istisnine po visini  $\overline{KF_o}$  iz jednadžbe:

$$\overline{KM_o} = \overline{KF_o} + \overline{M_o F_o} = \overline{KF_o} + \frac{I_T}{\nabla}.$$

Ako je poznat i položaj težišta broda po visini  $\overline{KG}$ , mogu se odrediti početna metacentarska visina i treći uvjet plovnosti iz jednadžbe:

$$\overline{M_o G} = \overline{KM_o} - \overline{KG}.$$

Analogni odnosi vrijede i za nagib broda  $\vartheta$  u uzdužnom smjeru.